Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 6, Feb.-Mar., 2023, p. 645-659

Water Use Efficiency Evaluation in Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying in Potato (*Solanum tuberosum* L.)

A. Asadi[1], H.R. Khazaie[2*], J. Nabati[3]

Received: 07-02-2022
Revised: 07-11-2022
Accepted: 29-11-2022
Available Online: 22-02-2023

How to cite this article:
Asadi, A., Khazaie, H.R., & Nabati, J. (2023). Water Use Efficiency Evaluation in Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying in Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Water and Soil 36*(6): 645-659. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/jsw.2022.75179.1141

Introduction

Due to climate change, one of the limiting factors of crop production is environmental stress which, by disrupting the natural metabolism of the plant, limit plant growth and finally reduce crop production. Drought stress causes the greatest reduction in crop productivity compared to other environmental stresses. Therefore, the use of methods to reduce water consumption in agriculture is more important due to the lack of freshwater resources. Increasing water use efficiency and maintaining plant yield by reducing water consumption has a particular importance for crop production and should be paid special attention. Drought stress reduces photosynthesis, stomatal conductance, biomass, growth and consequently plant yield. The effects of drought stress on the yield of plants such as potatoes (*Solanum tuberosum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.), rice (*Oryza sativa* L.) etc., which play an important role in the nutrition and food of the world, has a great importance. Achieving the desired soil moisture range is one of the most important approaches to increase water use efficiency and not significantly reduce yield. For this goal, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with five replications in the research greenhouse of Ferdowsi University of Mashhad.

Materials and Methods

Factors studied in this experiment included three levels of irrigation 1- full irrigation (100% of field capacity), 2- *medium* drought *stress* (70% of field capacity), 3- partial root-zone drying (70% of field capacity), time of induction of water stress (two weeks after planting and 50% at flowering time) and two levels of phosphate ($CaH_4[Po_4]_2$ H_2O) fertilizer (based on soil analysis (25 $mg.kg^{-1}$) and adding 25% more than recommended (31 $mg.kg^{-1}$)) at the beginning of the period phosphate was mixed with soil inside the pot in greenhouse condition. Fontane potato cultivar was used in this study. In irrigation treatments, one part of the pots was stressed two weeks after planting and the second part of the pots were fully irrigated until the beginning of flowering and irrigation treatments were applied at 50% flowering stage. From the prepared samples, membrane stability index, osmotic potential, and relative water content were measured in the laboratory and at the end of experiment, plant height, tuber weight, biomass and plant water use efficiency were measured. Minitab 18 software was used to analyze the data.

Results and Discussion

The results showed that with increasing phosphate fertilizer from 25 $mg.kg^{-1}$ to 31 $mg.kg^{-1}$, plant biomass increased significantly and in all treatments biomass increased between 2 to 28% . Partial root-zone drying treatment showed a 17.4% increase in biomass. In the *medium* drought *stress* treatment, the total growth period and

1 and 2- Ph.D. Student in Crop Physiology and Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: h.khazaie@um.ac.ir)
3- Assistant Professor, Research Center for Plant Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

phosphorus level of 31 $mg.kg^{-1}$, the lowest water use efficiency was observed, and there was no significant difference in the *medium* drought *stress* treatment of the total growth period and the phosphorus level of 25 $mg.kg^{-1}$. Partial root-zone drying treatment of roots from flowering time and 31 mg.kg-1 P, with full irrigation treatment 25 mg.kg-1 P have the same water use efficiency, but the performance of this treatment compared to full irrigation treatment was reduced by 28%. Water use efficiency in partial root-zone drying (intermittent irrigation) has increased compared to traditional irrigation, which indicates a more optimum use of water in the *medium* drought *stress* method. Full irrigation treatment had the highest tuber weight per plant and partial root-zone drying during the growing season treatment had the lowest tuber weight per plant (65%) compared to full irrigation. The partial root-zone drying treatment after flowering, ranked second after full irrigation treatment, for tuber weight per plant and more tuber weight per plant compared to other drought treatments. Using 31 $mg.kg^{-1}$ phosphate, tuber weight per plant in full irrigation treatment reached 332 $g.plant^{-1}$ which increased by 13% and was significantly different from all treatments. With increasing phosphate level from 25 $mg.kg^{-1}$ to 31 $mg.kg^{-1}$, in the partial root-zone drying treatment from flowering time, tuber weight per plant increased by 28% to 207 $g.plant^{-1}$. Tuber weight per plant in other drought treatments decreased with increasing phosphate level from 25 $mg.kg^{-1}$ to 31 $mg.kg^{-1}$, although this decrease was not statistically significant.

Conclusion

Compared to deficit irrigated methods, partial root-zone drying from the beginning of growth and full irrigation has the ability to use available nitrogen at the end of the growing season and has more greenery than other drought treatments. This effect probably explains the filling of the gland tubers at the end of the growing season and thus the keeping of yieldyield production. The best methods for saving water consumption and maintaining the yield, the partial root-zone drying methods is better than the medium drought stress method.

Keywords: Membrane stability, Relative humidity, Water use efficiency

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۶۵۹-۶۴۵

ارزیابی کارایی مصرف آب و عملکرد سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) با فراهمی کود فسفر در شرایط کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه

اعظم اسدی[1]- حمید خزاعی[2*]- جعفر نباتی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۸

چکیده

امروزه باتوجه به کمبود منابع آب، توجه بیشتری به استفاده از روش‌های کاهش مصرف آب در کشاورزی می‌شود. این پژوهش در سال ۱۳۹۵ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، روی گیاه سیب‌زمینی رقم فونتانه، اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل سه سطح آبیاری: آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی)، کم‌آبیاری (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، دو زمان اعمال تنش (دو هفته پس از کاشت و ۵۰ درصد گلدهی) و دو سطح کود فسفاته (براساس آزمایش خاک ($۲۵mg.Kg^{-1}$) و افزودن ۲۵ درصد بیشتر از میزان توصیه‌شده ($۳۱mg.Kg^{-1}$) بودند.در تیمارهای آبیاری یک قسمت از گلدان‌ها دو هفته بعد از کاشت، تحت تنش قرار گرفت و قسمت دوم گلدان‌ها تا شروع گلدهی به‌طور کامل آبیاری شدند و در مرحله ۵۰ درصد گلدهی تیمارهای آبیاری روی آن‌ها اعمال شد. با افزایش کود فسفاته از ۲۵ به $۳۱mg.Kg^{-1}$ میزان زیست‌توده گیاه افزایش یافت. تیمار آبیاری کامل و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه، به ترتیب ۲۸ و ۱۷/۴ درصد افزایش زیست‌توده نشان دادند. در تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و سطح فسفر $۳۱mg.Kg^{-1}$ کمترین کارایی مصرف آب مشاهده شد. کارایی مصرف آب تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی و $۳۱mg.Kg^{-1}$ فسفر، با تیمار آبیاری کامل در $۲۵mg.Kg^{-1}$ فسفر کارایی مصرف آب مشابه داشتند ولی در این تیمار عملکرد ۲۸ درصد کاهش یافت درصورتی‌که در تیمار کم‌آبیاری نسبت به تیمار آبیاری کامل، کارایی مصرف آب ۵۰ درصد کاهش عملکرد غده در تک بوته نشان داد؛ به‌طور کلی روش خشک‌کردن جزئی ریشه روش مناسب‌تری نسبت روش کم‌آبیاری ازنظر صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، زیست‌توده، ظرفیت زراعی، غده، فسفر

مقدمه

ازجمله عوامل محدودکننده تولیدات زراعی، تنش‌های محیطی می‌باشند که با ایجاد اختلال در متابولیسم طبیعی گیاه، رشد گیاه را محدود و درنهایت باعث کاهش تولید محصول می‌شوند (Chai, *et al.*, 2016). گیاهان زراعی در معرض چندین تنش محیطی قرار دارند که همه آن‌ها بر رشد و تکامل گیاه تأثیر می‌گذارند و مانع حداکثر بهره‌وری گیاهان زراعی می‌شوند (Farooq *et al.*, 2012). تنش خشکی، بیشترین کاهش بهره‌وری محصول را در مقایسه با دیگر تنش‌های محیطی ایجاد می‌کند. تنش خشکی، از طریق ایجاد تغییرات آناتومیک، مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی بر جنبه‌های مختلف رشد و نمو گیاه تأثیر می‌گذارد. شدت خسارت خشکی بستگی به طول مدت تنش و مرحله رشد گیاه متفاوت است. تنش خشکی باعث کاهش فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، زیست‌توده، رشد و درنهایت عملکرد گیاه می‌شود (Kasman and

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی و استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: h.khazaie@um.ac.ir)
۳- استادیار گروه بقولات، پژوهشکده علوم گیاهی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2022.75179.1141

Duman, 2015). بررسی اثرات تنش خشکی بر عملکرد گیاهانی مانند سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.)، گندم (*Triticum aestivum* L.)، برنج (*Oryza sativa* L.) و غیره که نقش مهمی در تغذیه و سبد غذایی مردم جهان دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

سیب‌زمینی رتبه چهارم را بعد از گندم، برنج و ذرت (*Zea mays*) در سبد غذایی مردم جهان به خود اختصاص داده است (Gültekin and Ertek, 2018). سیب‌زمینی یک محصول بسیار حساس به کمبود آب خاک است (Gültekin and Ertek, 2018). ریشه‌های کم‌پشت و کم‌عمق سیب‌زمینی باعث می‌شود این گیاه به کمبود آب آسیب‌پذیر باشد. شدت خشکی، مدت و زمان تنش خشکی در طول دوره‌های مختلف رشد سیب‌زمینی، بر عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Chai *et al*., 2016). سیب‌زمینی از حساسیت بالایی نسبت به تنش خشکی در تمام مراحل نموی به‌ویژه مرحله تشکیل غده برخوردار می‌باشد (Shock *et al*., 2013). اعمال هرگونه تنش، محتوای نسبی آب، کارایی مصرف آب، تعداد غده در بوته، درصد ماده خشک و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Quandahor *et al*., 2019).

فسفر یکی از عوامل مهم محدود کننده بهره‌وری محصول است و در سیستم‌های تولید سیب‌زمینی مدیریت کود فسفر یک بخش حیاتی است. فسفر رشد و توسعه شاخساره، تقسیم سلولی در ریشه و غده و سنتز نشاسته را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میزان فسفر کافی در گیاه برای بهینه‌سازی عملکرد، محتوای ماده خشک، کیفیت غذایی و مقاومت در برابر خشکی و بیماری‌ها ضروری است (Liu *et al*., 2015).

در دهه‌های اخیر، یکی از گزینه‌های مدیریت برای غلبه بر تنش خشکی در کشاورزی استفاده از روش خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه بوده است. روش خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه (PRD[1]) یک راه‌کار کم‌آبیاری است که برای نگهداری نیمی از سیستم ریشه در خشکی طراحی شده است، یا خشک‌کردن نیمی از ریشه درحالی‌که نیمه دیگر آن به‌منظور حفظ آب برگ آبیاری می‌شود سپس برعکس شده و اجازه می‌دهد قسمتی از ریشه که در حال خشک شدن بود آب جذب کند درحالی‌که قسمتی که آبیاری کامل انجام می‌گرفت در خشکی قرار می‌گیرد؛ بنابراین، به‌طور متناوب بخشی از ریشه در حال خشک شدن و بخشی در حال آبیاری کامل قرار می‌گیرد. این باعث القاء پیام هورمونی ازجمله آبسزیک اسید (ABA) شده و روزنه‌ها تا حدی بسته می‌شوند و بهبود کارایی مصرف آب را به همراه دارد. موفقیت کاربرد روش خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه متکی بر جابجایی منظم سمت خشک و آبیاری شده ریشه است و تا زمانی که پیام شیمیایی تحمل ریشه و نگهداری آماس و پتانسیل آب در قسمت هوایی گیاه رخ دهد، باید نگه‌داشته شود (Shi *et al*., 2015). روش آبیاری جزئی منطقه ریشه به دلیل کاهش آب آبیاری، در صرفه‌جویی مصرف آب و بهبود کارایی مصرف آب مفید است. اساس فیزیولوژیکی برای بهبود کارایی مصرف آب در هر دو روش کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی ریشه، مبتنی بر استفاده سیستم پیام‌رسانی آبسزیک اسید ریشه به ساقه است که باعث می‌شود در طول خشک شدن متوسط خاک، هدایت روزنه‌ای کاهش‌یافته و سرعت تعرق کم شود (Chai, *et al*., 2016). یکی دیگر از مهم‌ترین عوامل در تولید و رشد گیاهان زراعی، آب است که می‌تواند به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گیرد و تولیدات گیاهان زراعی را با مشکل مواجه کند.

افزایش کارایی مصرف آب و حفظ عملکرد گیاه با کاهش مصرف آب، برای تولید گیاهان زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و باید به این مهم توجه ویژه‌ای شود. دست یافتن به دامنه‌های پاسخ رطوبتی برای افزایش کارایی مصرف آب و عدم کاهش چشمگیر عملکرد، یکی از مهم‌ترین رویکردها است؛ با توجه به حساسیت گیاه سیب‌زمینی به تنش خشکی و دست یافتن به روشی به منظور کاهش مصرف آب با حداقل خسارت، این مطالعه با هدف بررسی روش کم‌آبیاری و مقایسه با آبیاری کامل در فراهمی فسفر، میزان کاهش عملکرد سیب‌زمینی، بهترین کارایی مصرف آب روی فرایندها و کارکردهای گیاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. عوامل موردمطالعه شامل سه سطح آبیاری (آبیاری کامل که در آن رطوبت گلدان‌ها همیشه در حالت ظرفیت زراعی نگهداری شد، تنش کم (رطوبت گلدان‌ها حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداری شدند) و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه (یک قسمت گلدان در حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی آبیاری شدند و قسمت مقابل آن اجازه داده شد تا ۶۰–۷۰ درصد رطوبت از دست دهد سپس مکان آبیاری در گلدان جابجا شد). زمان اعمال تنش آبی (دو هفته پس از کاشت و زمان ۵۰ درصد گلدهی) و کاربرد کود فسفاته (سوپر فسفات تریپل ($CaH_4[PO_4]_2$ H_2O) در دو سطح (فسفر به میزان موردنیاز بر اساس آزمایش خاک ($۲۵mg.Kg^{-1}$) و ۲۵ درصد بیشتر از میزان توصیه‌شده ($۳۱ mg.Kg^{-1}$)) که در ابتدای دوره با خاک داخل گلدان مخلوط شد (جدول ۱). رقم سیب‌زمینی فونتانه در این مطالعه مورداستفاده قرار گرفت.

1- Partial Rootzone Drying

جدول ۱- مشخصات فیزیکوشیمیایی خاک مورداستفاده در آزمایش

Table 1- Physico-chemical characteristics of the soil used in the test

pH اسیدیته	EC ($dS.m^{-1}$) هدایت الکتریکی	Bulk Density ($g.cm^3$) وزن مخصوص ظاهری	OC% کربن آلی	Clay% رس	Sand% شن	Silt% سیلت	N% نیتروژن	P ($mg.Kg^{-1}$) فسفر	K ($mg.Kg^{-1}$) پتاسیم
7.9	1.15	1.4	0.17	12	59	29	0.026	1.5	80

گلدان‌هایی با ارتفاع ۴۰سانتی‌متر و قطر دهانه ۳۲ سانتی‌متر انتخاب شدند. برای اعمال روش خشک کردن جزئی ریشه و کنترل رطوبت خاک در دو طرف ریشه، گلدان با استفاده از صفحات پلاستیکی به دو بخش مساوی تقسیم و صفحه جداکننده با بدنه گلدان کاملاً آب‌بندی شد تا از نفوذ رطوبت به دو طرف جلوگیری شود. سپس از وسط لبه بالایی صفحه جداکننده به عمق ۱۰ سانتی‌متر قطعه‌ای جدا شد و گیاهچه به صورتی در این قسمت قرار گرفت که ریشه گیاه در طرفین صفحه جداکننده قرار بگیرد و رشد کند. بافت خاک داخل گلدان‌ها بر اساس آزمایش هیدرومتری خاک، شنی- لومی تعیین شد. روش خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه به این صورت بود که یک قسمت از گلدان‌ها دو هفته بعد از کاشت تحت تنش خشکی قرار گرفتند و قسمت دوم گلدان‌ها تا مرحله گلدهی به‌صورت کامل آبیاری شدند و بعدازاینکه ۵۰ درصد گیاهان وارد مرحله گلدهی شدند تنش خشکی روی آن‌ها اعمال شد. سطح رطوبت در هر گلدان با نصب حسگر دستگاه رطوبت‌سنج خاک (Soil Moisture Meter) مدل (M0750) در گلدان‌ها تحت نظر قرار گرفت. همچنین حس‌گرهای رطوبتی (TDR) به طول ۱۶ سانتی‌متر در عمق ۲۵ سانتی‌متری گلدان، در دو تکرار اندازه‌گیری شد. ابتدا حسگرها بر اساس شرایط رطوبتی خاک گلدان‌ها واسنجی شدند و رابطه بین رطوبت حجمی خاک و عدد قرائت‌شده از حس‌گر استخراج شد. برای تعیین میزان آب لازم برای اعمال تیمار آبیاری، رطوبت خاک در ساعت ۸ الی ۹ صبح به‌صورت روزانه با استفاده از حس‌گر رطوبتی قرائت‌شده و حجم آب لازم با استفاده از معادله (۱) محاسبه گردید. و به هرگلدان داده شد.

$$V= (\theta 1-\theta 2) \times Z \times A \qquad (۱)$$

در رابطه فوق: V، حجم آب موردنیاز برحسب مترمکعب، θ1، رطوبت حجمی خاک در سطح تنش موردنظر، θ2، رطوبت حجمی قرائت‌شده خاک توسط دستگاه، Z، عمق ریشه گیاه که در این مطالعه برابر با نیم متر لحاظ شد و A، متوسط سطح مقطع گلدان برحسب متر مربع بود. در تیمار آبیاری کامل رطوبت خاک همواره در حد ظرفیت زراعی ۵± درصد نگهداری شد و در تیمارهای کم‌آبیاری سنتی، رطوبت خاک همواره (۷۰ درصد ظرفیت زراعی) ۵± درصد نگهداری شد. در تیمارهای خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه، آبیاری در یک سمت ریشه انجام شد و رطوبت آن در سطح تنش موردنظر ۵± درصد کنترل گردید. پس از یک هفته و در شرایطی که ۷۰-۶۰ درصد رطوبت موجود در بخش خشک ریشه کاهش یافت، آبیاری بین دو قسمت، جابه‌جا و این تناوب تا انتهای دوره رشد تکرار شد.

محتوای رطوبت نسبی برگ

محتوای رطوبت نسبی برگ، در دو مرحله آزمایش(زمان ۵۰ درصد گلدهی و انتهای آزمایش) اندازه‌گیری شد. به این منظور، یک برگ در دمای آزمایشگاه وزن شد، سپس به مدت ۲۴ ساعت داخل پتری دیش به‌صورت غوطه‌ور در آب قرار گرفت. برای به دست آوردن وزن نمونه در حالت آماس، بعد از خروج نمونه از پتری دیش آب اضافی آن با دستمال‌کاغذی گرفته شده و وزن گردید، سپس برای ۲۴ ساعت نمونه داخل یک فویل با وزن مشخص، داخل آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. پس از خروج نمونه از آون، نمونه‌ها وزن شدند تا وزن خشک نمونه مشخص شود و مقدار رطوبت نسبی برگ هر نمونه از معادله (۲) به دست آمد.

$$\text{محتوای نسبی آب برگ} = \frac{(\text{وزن خشک} - \text{وزن تر})}{(\text{وزن خشک} - \text{وزن تورژسانس})} \times ۱۰۰ \qquad (۲)$$

پتانسیل اسمزی

در دو مرحله آزمایش(زمان ۵۰ درصد گلدهی و انتهای آزمایش)، پتانسیل اسمزی نمونه برگ با استفاده از دستگاه اسمومتر مدل (OM802.D) شرکت Wogel بر پایه روش نقطه انجماد تعیین شد. ابتدا نمونه‌های برگ و ریشه در ریزلوله‌های (میکروتیوب) ۰/۵ میلی‌لیتری همگن (هموژنیزه) و عصاره‌گیری شد. دستگاه اسمومتر توسط محلول استاندارد گلوکز واسنجی شد سپس پتانسیل اسمزی عصاره به‌دست آمده توسط دستگاه، تعیین کمیت شد.

پایداری غشاء

میزان پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی بر اساس تشکیل کمپلکس مالون دی‌آلدئید (Malondialdehyde; MDA) با تیوباربیتوریک اسید (TBA) سنجش شد و غلظت MDA با استفاده از ضریب تصحیح $M^{-1}\times Cm^{-1}$ ۱/۵۵×۱۰^۵ با طول‌موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Heath and Packer, 1968).

ارتفاع بوته و زیست‌توده

ارتفاع بوته از سطح خاک، وزن‌تر اندام هوایی، وزن‌تر غده در انتهای دوره رشد اندازه‌گیری شد. سپس اندام هوایی و غده‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون قرار داده شدند و پس‌ازآن وزن خشک اندام هوایی و غده‌ها اندازه‌گیری شد.

کارایی مصرف آب

با تقسیم عملکرد غده و زیست‌توده گیاه در هر گلدان بر میزان آب مصرفی همان گلدان، راندمان مصرف آب محاسبه شد.

تجزیه‌وتحلیل آماری

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از آزمون LSD انجام شد. اگر تیمارها در سطح پنج درصد معنی‌دار شده بودند مقایسه میانگین‌ها صورت گرفت. برای آنالیز داده‌ها از نرم‌افزار Minitab 18 و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel 16 استفاده شد.

نتایج و بحث

محتوای رطوبت نسبی برگ

در مرحله گلدهی و مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی محتوای نسبی آب برگ، بین تیمارهای مختلف تفاوت آماری معنی‌داری وجود داشت (جدول ۲). در مرحله گلدهی، تیمار آبیاری کامل بیشترین محتوای نسبی آب برگ را به خود اختصاص داد و بین تیمارهای خشکی تفاوت معنی‌دار آماری وجود نداشت. در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی نیز در تیمار آبیاری کامل بیشترین محتوای نسبی آب برگ مشاهده شد، میزان نسبی آب برگ در تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری معنی‌دار نداشت؛ و محتوای نسبی آب برگ در تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت آماری معنی‌دار نداشت (جدول ۲).

کاربرد کود فسفر، در هر دو مرحله گلدهی و ۲۱ روز پس از گلدهی، تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ نشان نداد و افزایش ۲۵ درصدی کود فسفر بر محتوای آب برگ تأثیری نداشت (جدول ۲).

جدول ۲- اثر کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه بر محتوای نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشاء و پتانسیل اسمزی در سیب‌زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 2- Effect of deficit irrigation and partial root zone drying on, relative water content, membrane stability index and osmotic potential of potato at different growth stages

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Relative water content محتوای نسبی آب (%)	Membrane stability index پایداری غشاء (%)	Osmotic potential پتانسیل اسمزی (MPa)
Flowering گلدهی	Control کنترل	845[a]	37.5[a]	1.4[b]
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری۱	932[a]	34.4[a]	1.3[b]
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه۱	864[a]	37.5[a]	1.5[a]
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	937[a]	26.1[a]	1.4[d]
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری۱	834[ab]	22.6[a]	1.6[c]
	Deficit irrigation 2 کم آبیاری۲	732[bc]	17.2[a]	2.1[a]
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه۱	646[c]	19.2[a]	1.7[c]
	Partial root drying 2 خشک کردن جزئی ریشه۲	751[bc]	26.4[a]	1.9[b]

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست‌ویک روز پس از گلدهی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفر حاکی از تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بود (جدول ۳). با افزایش فسفر خاک در مرحله گلدهی، در تیمار آبیاری کامل چهار درصد و خشک‌کردن جزئی ریشه ۱۵ درصد محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت و تیمار آبیاری کامل و ۳۱mg.Kg^{-1} کود فسفر با ۷۴/۵ درصد، بیشترین محتوای آب برگ را داشت و سایر تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت معنی‌دار آماری نداشتند (جدول ۳). کاربرد ۳۱mg.Kg^{-1} فسفر در تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی با ۵۷ درصد کمترین درصد محتوای نسبی آب را در بین تمام تیمارها به خود اختصاص داد که ۱۷/۵ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش داشت و تفاوت معنی‌داری بین دیگر تیمارهای خشکی با تیمار آبیاری کامل وجود نداشت (جدول ۳).

محتوای نسبی آب برگ، یکی از ویژگی‌های اصلی روابط آب گیاهان به شمار می‌رود (Chai *et al*., 2016) که به دلیل کاهش آب در شرایط تنش تحت تأثیر کمبود آب قرار می‌گیرد. در شرایط تنش خشکی محتوای نسبی آب برگ در گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) کاهش یافت؛ درحالی‌که پتانسیل آب ریشه خیلی زودتر از برگ و غلاف کاهش یافت (Thalmann and Santelia, 2017). محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب برگ و پتانسیل اسمزی در آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفتند (Farooq *et al*., 2012). بااین‌حال، در مواجهه با تنش خشکی ژنوتیپ‌های مختلف رفتار متفاوت نشان می‌دهند، پتانسیل آب برگ در ژنوتیپ‌های متحمل در برابر خشکی نسبت به ژنوتیپ‌های حساس پس از مواجهه با خشکی، برای مدت طولانی بالاتر می‌ماند (Chai *et al*., 2016). با توجه به‌شدت و مدت خشکی اثرات خشکی متفاوت است. با کاهش شدید خشکی، محتوای نسبی آب برگ به‌طور خطی کاهش می‌یابد. برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد در گیاه آنیسون (*Pimpinella anisum* L.) با اعمال تنش خشکی محتوای نسبی آب برگ در هر دو مرحله گلدهی و پر شدن دانه کاهش می‌یابد. بدین معنی که در اوایل دوره تنش تفاوت معنی‌داری بین محتوای نسبی آب برگ تیمار شاهد تیمار تحت تنش وجود نداشت، ولی با افزایش شدت تنش، پس از گذشت یک هفته محتوای آب نسبی در هر دو مرحله گلدهی و پر شدن دانه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. تغییر جزئی محتوای نسبی آب برگ احتمالاً بیانگر پیام‌های ارسالی از ریشه در شرایط تنش خشکی که عامل بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز می‌باشد این پیام‌های شیمیایی همان اسید آبسزیک می‌باشد. بالا بودن محتوای نسبی آب برگ در شرایط کم‌آبی می‌تواند با رفتار روزنه‌ها و سیستم ریشه‌ای گیاه در ارتباط باشد، زیرا یک گیاه برای حفظ محتوای رطوبتی درونی نیاز به داشتن ریشه عمیق به منظور جذب آب دارد (Heidari *et al*., 2014).

تفاوت میان ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک متفاوت نظیر تغییر اندازه برگ، زاویه برگ وجود یا عدم وجود موم و بازتاب برگ و روزنه‌ها باعث تفاوت بین ارقام ازلحاظ محتوای نسبی آب برگ در بین ارقام متحمل و حساس متفاوت است (Quandahor *et al*., 2019). با گذشت زمان از ابتدای تنش میزان رطوبت نسبی برگ کاهش یافته است. همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شده در تیمار آبیاری خشک کردن جزئی ریشه با افزایش فسفر، محتوای نسبی آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری معنی‌داری ندارد چون همیشه نیمی از ریشه در حالت هیدراته قرار دارد و رطوبت نسبی برگ حفظ می‌شود ولی در تیمار کم‌آبیاری رطوبت نسبی برگ کاهش می‌یابد.

شاخص پایداری غشاء

در زمان گلدهی و همچنین در ۲۱ روز پس از گلدهی بین تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار ازنظر شاخص پایداری غشاء وجود نداشت (جدول ۲).

شاخص پایداری غشاء تحت تأثیر کود فسفاته قرار نگرفت. در زمان گلدهی و همچنین مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، افزایش کود فسفاته از ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم باعث کاهش شاخص پایداری غشاء شد ولی این کاهش معنی‌دار نبود.

برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد کود فسفاته بر شاخص پایداری غشاء برگ‌های سیب‌زمینی، حاکی از تفاوت معنی‌داری بین تیمارها بود (جدول ۳). در مرحله گلدهی و کاربرد ۲۵mg.Kg^{-1} فسفر، تیمار آبیاری کامل با ۴۴/۲ درصد، بیشترین شاخص پایداری غشاء مشاهده شد و بین تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد با آبیاری کامل ازنظر شاخص پایداری غشاء تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. با افزایش کاربرد کود فسفر به ۳۱mg.Kg^{-1} شاخص پایداری غشاء در تیمار خشک کردن جزئی ریشه کل دوره رشد ۱۰/۷ درصد افزایش یافت و در دو تیمار دیگر حدود دو درصد کاهش شاخص پایداری غشاء مشاهده شد (جدول ۳).

هدف اصلی فرایندهای تخریبی القاء شده با خشکی، غشاءها هستند و مشخص شده است که تحت تنش خشکی محتوای لیپید غشاء به دلیل ممانعت از بیوسنتز لیپیدها و تحرک لیپولیتیک و فعالیت‌های پراکسیداتیو، کاهش پیدا می‌کند (Chaki *et al*., 2020). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده توسط پژوهشگران، در پاسخ به تنش خشکی شاخص پایداری غشاء در گیاه نخود (*Cicer arietinum* L.) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (Yactayo *et al*., 2013). در گیاه خیار (*Cucumis sativus* L.)، میزان نشت یونی تأثیر تنش خشکی افزایش یافت. تنش خشکی با شروع یک تنش اکسیداتیو همراه است؛ بنابراین در طی تنش خشکی تولید و ذخیره گروه‌های

سمی و مخرب اکسیژن آزاد افزایش یابد. درنتیجه تحت شرایط تنش خشکی به‌سرعت چربی‌های غشاء پراکسید گردیده و پایداری غشاء یاخته از بین می‌رود (Bayat *et al.*, 2013). نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش در ۲۱ روز پس گلدهی با این مطالب مطابقت دارد. پژوهشگران بیان کردند با افزایش شدت تنش خشکی میزان پایداری غشاء سلولی کاسته شده است و چنانچه تنش خشکی در مراحل انتهایی‌تر رشد رخ دهد شدت نشت از دیواره سلولی افزایش یافته و پایداری غشاء کمتر می‌شود (Quandahor *et al.*, 2019). در ارزیابی خسارت سلولی شاخص پایداری غشاء به‌عنوان نفوذپذیری غشاء مورداستفاده قرار گرفت، نتایج نشان داد که تخلیه رطوبت خاک تأثیر معنی‌داری بر کاهش پایداری غشاء سلولی دارد (Dashti *et al.*, 2014). با توجه به شاخص‌های فیزیولوژیکی و مکانیسم‌های موردمطالعه در این پژوهش، به احتمال زیاد افزایش کربوهیدرات‌های محلول باعث افزایش پتانسیل اسمزی شده و باعث حفظ آب درون سلول درنتیجه حفاظت از ساختار غشاء و جلوگیری از پراکسیداسیون غشاء شده است.

پتانسیل اسمزی

در زمان گلدهی، پتانسیل اسمزی در برگ سیب‌زمینی در تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه با ۱۰ درصد افزایش نسبت به آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری داشت و بین تیمار آبیاری کامل و تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۲). تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی بیشترین میزان پتانسیل اسمزی را نشان داد و تیمار آبیاری کامل کمترین میزان پتانسیل اسمزی را نشان داد، تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی با ۱۰ درصد کاهش در رتبه دوم و تیمارهای خشک‌کردن جزئی ریشه کل دوره و کم‌آبیاری کل دوره رشد با ۲۳ درصد کاهش پتانسیل اسمزی در رتبه سوم قرار گرفتند و تمام تیمارهای خشکی با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار داشتند (جدول ۲).

جدول ۳- اثر تیمارهای آبیاری و کود فسفاته در مراحل مختلف رشد بر محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشاء و پتانسیل اسمزی در سیب‌زمینی

Table 3- Effect of irrigation and phosphate fertilizer treatments at different growth stages on relative water content, membrane stability index and osmotic potential in potato

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Relative water content محتوای نسبی آب (%)		Membrane stability index شاخص پایداری غشاء (%)		Osmotic potential پتانسیل اسمزی (MPa)	
		Triple superphosphate ($mg.Kg^{-1}$) سوپرفسفات تریپل					
		25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	Control کنترل	71.9^{ab}	77.0^{a}	44.2^{a}	30.7^{b}	1.4^{b}	1.4^{bc}
	Deficit irrigation₁ کم آبیاری۱	69.2^{b}	67.9^{b}	31.0^{b}	37.6^{ab}	1.4^{bc}	1.3^{c}
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه۱	66.6^{b}	69.2^{b}	42.4^{a}	32.5^{b}	1.6^{a}	1.5^{ab}
21 days after flowering ۲۱روز پس از گلدهی	Control کنترل	72.0^{a}	74.5^{a}	34.3^{a}	17.9^{c}	1.4^{c}	1.4^{c}
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری ۱	69.8^{ab}	67.7^{ab}	23.7^{bc}	21.6^{c}	1.6^{b}	1.6^{b}
	Deficit irrigation 2 کم آبیاری۲	67.2^{ab}	57.1^{c}	16.3^{c}	18.0^{c}	2.0^{a}	2.1^{a}
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه۱	66.6^{a-c}	65.7^{a-c}	20.2^{c}	18.2^{c}	1.7^{b}	1.7^{b}
	Partial root drying 2 خشک کردن جزئی ریشه۲	60.2^{bc}	70.5^{a}	20.0^{c}	30.7^{b}	2.0^{a}	1.7^{b}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد تنش خشکی اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست‌ویک روز پس از گلدهی تیمار خشکی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

با افزایش کاربرد کود فسفاته از $۲۵mg.Kg^{-1}$ به $۳۱mg.Kg^{-1}$ در مرحله گلدهی میزان پتانسیل اسمزی کاهش یافت؛ درحالی‌که در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی با کاربرد $۳۱mg.Kg^{-1}$ فسفر، پتانسیل اسمزی کاهش معنی‌داری نشان نداد (جدول ۳).

برهمکنش کاربرد کود فسفاته و تیمارهای آبیاری نشان داده است در مرحله گلدهی با کاربرد $۲۵mg.Kg^{-1}$ فسفر میزان پتانسیل اسمزی در تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه با ۱/۶ مگاپاسگال، بیشترین مقدار و ۱۲/۵ درصد از تیمار شاهد بیشتر بود و با آن تفاوت معنی‌دار داشت. با افزایش کود فسفاته به $۳۱mg.Kg^{-1}$ میزان پتانسیل اسمزی کاهش یافت و اختلاف بین تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد و تیمار آبیاری کامل معنی‌دار نبود، ولی با تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۳).

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی در سطح $۲۵mg.Kg^{-1}$ کود فسفاته بیشترین مقدار پتانسیل اسمزی با دو مگا پاسگال به تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی و تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی اختصاص یافت و با دیگر تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار داشتند و تیمارهای خشک‌کردن جزئی ریشه در کل دوره رشد و تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد با ثبت پتانسیل اسمزی ۱/۷ مگاپاسگال و ۱۵ درصد کمتر نسبت به آن‌ها، در رده دوم قرار گرفتند. میزان پتانسیل اسمزی در تیمار آبیاری کامل در کمترین مقدار بود. با افزایش کود فسفات، تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی بیشترین میزان پتانسیل اسمزی را به خود اختصاص داد. تفاوت بین تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی با دو تیمار دیگر خشکی معنی‌دار نبود و همچنان کمترین میزان پتانسیل اسمزی به تیمار آبیاری کامل تعلق گرفت (جدول ۳).

افزایش غلظت مواد محلول سلول و حفظ فشار آماس را تنظیم اسمزی گویند؛ و مهم‌ترین مکانیسم در حفظ فعالیت‌های فیزیولوژیکی ازجمله پتانسیل آب برگ است و در بسیاری از گیاهان حفظ تورژسانس توسط تنظیم اسمزی موجب بهبود عملکرد و زنده‌مانی گیاه در شرایط تنش خشکی است (Chai *et al.*, 2016). نتایج پژوهشگران در گیاه نخود نشان داد در تیمارهای تحت تنش خشکی رطوبت آب برگ به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و به دنبال آن با غلیظ شدن مواد درون یاخته‌ای، میزان قدر مطلق پتانسیل اسمزی برگ در تیمارهای تحت تنش نسبت به شاهد به‌طور معنی‌دار افزایش پیدا کرد (Zare Mehrjerdi *et al.*, 2016). فرض بر این است که تنظیم اسمزی در برگ‌ها و ایجاد مکش منفی به درون یاخته‌ها باعث افزایش توانایی گیاه برای جذب آب از خاک و درنتیجه بهبود توانایی گیاه برای تحمل به خشکی می‌شود (Yactayo *et al.*, 2013). در این پژوهش با اعمال تنش خشکی قدرمطلق پتانسیل اسمزی افزایش یافته و این به دلیل افزایش مواد محلول داخل سلول است در تیمار خشک کردن جزئی ریشه نیمی از ریشه در حالت خشکی قرار دارد تا با القاء اسیدآبسزیک باعث افزایش مواد محلول سلول و افزایش قدرمطلق پتانسیل اسمزی و تحمل بهتر تنش شود. به همین دلیل در آخر فصل گیاهان این تیمار آبیاری و تیمار آبیاری کامل سبز بودند ولی تیمار کم‌آبیاری خشک شده بودند.

ارتفاع بوته

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، بیشترین ارتفاع بوته در تیمار آبیاری خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه از زمان گلدهی به ثبت رسید. تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و تیمار خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد در رده دوم قرار گرفتند (جدول ۴).

تأثیر افزایش کود فسفاته بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۵). با افزایش مقدار فسفر از $۲۵mg.Kg^{-1}$ به $۳۱mg.Kg^{-1}$ ارتفاع بوته شش سانتی‌متر افزایش یافته است (جدول ۵). برهمکنش کود فسفاته و تیمارهای آبیاری بر ارتفاع بوته حاکی از تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بود (جدول ۶). تیمار آبیاری کامل و کاربرد $۳۱mg.Kg^{-1}$ فسفات در زمان گلدهی بیشترین ارتفاع بوته را به ثبت رساند و با تمام تیمارهای خشکی تفاوت معنی‌دار داشت؛ و تیمار آبیاری کامل و سطح کاربرد $۲۵mg.Kg^{-1}$ فسفات در رده دوم قرار گرفته است و با تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد تفاوت معنی‌دار داشت. با کاربرد $۳۱mg.Kg^{-1}$ فسفات، ارتفاع بوته در تمام تیمارها افزایش پیدا کرد و تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد پایین‌ترین ارتفاع بوته را دارا بود.

در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی، در سطوح مختلف کود فسفاته بین تیمارهای مختلف آبیاری تفاوت معنی‌دار وجود داشت (جدول ۶). تیمار خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد و کاربرد $۳۱mg.Kg^{-1}$ فسفات با بیشترین ارتفاع بوته در رده اول و تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد تیمار خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه و کاربرد $۲۵mg.Kg^{-1}$ فسفات با کاربرد $۳۱mg.Kg^{-1}$ فسفات، کمترین ارتفاع بوته را دارا بود (جدول ۶). با افزایش سطح فسفر خاک، ارتفاع بوته در تمام تیمارهای آبیاری به‌طور معنی‌دار افزایش پیدا کرد.

در روش آبیاری خشک‌کردن جزئی ریشه ارتفاع بوته سیب‌زمینی بیشتر از آبیاری کامل بود (Roosta *et al.*, 2010) که این نتایج با مرحله پس از گلدهی در این آزمایش مطابقت دارد. تنش خشکی بر ارتفاع، وزن خشک ریشه و زیست‌توده خیار تأثیر معنی‌داری نداشت (Bayat *et al.*, 2013). افزایش میزان فسفر خاک باعث افزایش ارتفاع و رشد گیاه سیب‌زمینی شد و ارتفاع بوته در رژیم‌های آبیاری کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی ریشه مشابه یکدیگر بود (Sun *et al.*, 2015).

جدول ٤- اثر کم‌آبیاری و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه بر ارتفاع بوته، زیست‌توده، وزن غده و کارایی مصرف آب در سیب‌زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 4- Effect of deficit irrigation and partial root zone drying on, plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency of potato at different growth stages

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Plant height ارتفاع بوته (cm)	Biomass زیست‌توده (g.plant^{-1})	Tuber weight وزن غده (g.plant^{-1})	Water use efficiency کارایی مصرف آب
Flowering گلدهی	Control کنترل	67.16^{a}	-	-	-
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری۱	58.39^{b}	-	-	-
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه۱	58.90^{b}	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	67.2^{a}	14.6^{a}	311^{a}	5.39^{a}
	Deficit irrigation 1 کم آبیاری۱	58.4^{b}	9.90^{b}	145^{cd}	5.01^{ab}
	Deficit irrigation 2 کم آبیاری۲	66.7^{a}	10.60^{b}	156^{bc}	3.46^{c}
	Partial root drying 1 خشک کردن جزئی ریشه۱	57.7^{b}	9.73^{b}	122^{d}	4.84^{ab}
	Partial root drying 2 خشک کردن جزئی۲	71.4^{a}	13.7^{a}	178^{b}	4.57^{b}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست‌ویک روز پس از گلدهی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2.

جدول ۵- اثر کود فسفاته بر ارتفاع بوته، زیست‌توده، وزن غده و کارایی مصرف آب سیب‌زمینی در مراحل مختلف رشد

Table 5- Effect of phosphate fertilizer on plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency potato leaves at different growth stages

Stages مرحله	Plant height ارتفاع بوته (cm)		Biomass زیست توده (g.plant^{-1})		Tuber weight وزن غده (g.plant^{-1})		Water use efficiency کارایی مصرف آب	
	Triple superphosphate (mg.Kg^{-1}) سوپرفسفات تریپل							
	25	31	25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	59.43^{b}	63.53^{a}	-	-	-	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	61.71^{b}	67.5^{a}	10.8^{b}	12.6^{a}	175^{a}	189^{a}	4.58^{a}	4.74^{a}

در هر صفت، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

In each treat means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD.

با اعمال روش‌های کم‌آبیاری و خشک کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد، گیاه از ابتدا تحت شرایط تنش قرار گرفته و ارتفاع بوته کاهش یافته ولی در روش خشک کردن جزئی ریشه بعد از گلدهی، چون همیشه نیمی از ریشه در حالت هیدراته قرار دارد گیاه کاهش ارتفاع چندانی نداشته و با افزایش کود فسفر و رشد ریشه بیشتر و استفاده بهتر از نیتروژن خاک، ارتفاع بوته از آبیاری کامل نیز بیشتر بود.

زیست‌توده

میزان زیست‌توده گیاه سیب‌زمینی در تیمارهای مختلف آبیاری

تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند (جدول ۴). در مرحله ۲۱ روز پس از گلدهی تیمار خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه با تیمار آبیاری کامل تفاوت آماری نداشت. تیمارهای کم‌آبیاری، کم‌آبیاری کل دوره رشد و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه کل دوره رشد با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند و در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴). با افزایش کود فسفاته میزان زیست‌توده گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و در کل تیمارها بین ۲ تا ۲۸ درصد افزایش زیست‌توده مشاهده شد (جدول ۵). برهمکنش تیمارهای آبیاری و کاربرد کود فسفاته بر میزان زیست‌توده سیب‌زمینی رقم فونتانه نشان داد باوجوداین که در تیمار آبیاری کامل با افزایش کود فسفاته میزان زیست‌توده نیز افزایش یافت ولی در تیمارهای خشکی کاربرد کود فسفاته اثر معنی‌داری بر زیست‌توده گیاه نداشت (جدول ۶). با افزایش کود فسفاته از ۲۵mg.Kg[-1] به مقدار ۳۱mg.Kg[-1] مقدار زیست‌توده، در تیمار آبیاری کامل و خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه، به ترتیب ۲۸ و ۱۷/۴ درصد افزایش یافت و بقیه تیمارهای خشکی با یکدیگر تفاوت آماری معنی‌داری نداشتند (جدول ۶).

با توجه به نوع محصول و زمان وقوع کمبود آب حساسیت گیاه به کمبود آب متفاوت است. در گیاه برنج تیمار کم‌آبیاری در مرحله پنجه زنی فعال تعداد پنجه، ساقه، خوشه و تعداد سنبلچه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد و درنهایت منجر به کاهش عملکرد دانه شد (Hussain *et al*., 2018). طی مراحل تاسل‌دهی ذرت مدت‌زمان کوتاه کمبود آب، ۳۰ درصد تولید زیست‌توده و ۴۰ درصد عملکرد دانه را کاهش داد (Chai *et al*., 2016). تنش آب در سویا (*Glycine max*) هنگامی‌که کم‌آبیاری در زمان اوایل گلدهی و در مرحله پایان گلدهی اعمال شد به میزان ۹ تا ۱۳ درصد، در زمان توسعه غلاف ۴۵ درصد و در هنگام انتهای غلاف دهی ۴۶ درصد کاهش عملکرد را موجب گردید (Chai *et al*., 2016). نتایج مطالعه دیگر میان سه رژیم آبیاری، نشان داد در گیاه سیب‌زمینی گیاهانی که تحت شرایط آبیاری کامل رشد می‌کنند، ماده خشک اندام هوایی و گیاهانی که تحت تنش خشکی جزی منطقه ریشه رشد کرده بودند، ماده خشک ریشه به‌طور قابل‌توجهی بالاتر بود و پس از آن گیاهان تحت شرایط کم‌آبیاری پایین‌ترین ماده خشک را تولید کردند (Sun *et al*., 2015).

جدول ٦- اثر تیمارهای آبیاری و کود فسفاته در مراحل مختلف رشدی بر ارتفاع بوته، زیست‌توده، وزن غده و کارایی مصرف آب در سیب‌زمینی

Table 6- Effect of irrigation and phosphate fertilizer treatments at different growth stages on plant height, biomass, tuber weight and water use efficiency in potato

Stages مرحله	Irrigation آبیاری	Plant height ارتفاع گیاه (cm)		Biomass زیست‌توده (g.plant^{-1})		Tuber weight وزن غده (g.plant^{-1})		Water use efficiency کارایی مصرف آب	
		Triple superphosphate (mg.Kg^{-1}) سوپرفسفات تریپل							
		25	31	25	31	25	31	25	31
Flowering گلدهی	Control کنترل	64.3^{ab}	70.0^{a}	-	-	-	-	-	-
	Deficit irrigation$_1$ کم آبیاری۱	56.2^{c}	60.6^{bc}	-	-	-	-	-	-
	Partial root drying$_1$ خشک کردن جزئی ریشه۱	57.8^{bc}	60.0^{bc}	-	-	-	-	-	-
21 days after flowering ۲۱ روز پس از گلدهی	Control کنترل	64.3^{c-e}	70.0^{a-c}	12.3^{c}	17.1^{a}	289^{b}	332^{a}	4.82^{bc}	5.97^{a}
	Deficit irrigation$_1$ کم آبیاری۱	56.2^{f}	60.0^{ef}	10.2^{de}	9.6^{e}	147de	143de	5.41^{ab}	4.63^{bc}
	Deficit irrigation$_2$ کم آبیاری۲	62.0^{d-f}	71.5^{ab}	9.7^{e}	11.6^{cd}	165^{d}	147de	3.60^{de}	3.34^{e}
	Partial root drying$_1$ خشک کردن جزئی ریشه۱	55.4^{f}	60.0^{ef}	9.7^{e}	9.8^{e}	129^{e}	116^{e}	4.82^{bc}	4.87^{bc}
	Partial root drying$_2$ خشک کردن جزئی ریشه۲	67.4^{b-d}	75.4^{a}	12.4^{c}	15.0^{b}	148d^{e}	207^{c}	4.25^{cd}	4.89^{bc}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. تیمارهایی که از ابتدای دوره رشد تنش خشکی اعمال شدند با عدد ۱ و تیمارهایی که بیست‌ویک روز پس از گلدهی تیمار خشکی اعمال شدند با عدد ۲ نشان داده شدند.

In each column means followed by the same letters are not significantly different ($p \leq 0.05$), at 5% probability level based on LSD. Treatments that were applied from the beginning of the growth period with the number 1 and the treatments that were applied twenty one days after flowering were indicated by the number 2

پژوهشگران گزارش کردند وزن زیست‌توده سیب‌زمینی در دو روش کم‌آبیاری سنتی و خشک‌کردن جزئی ریشه حدود ۲۴ درصد کمتر از تیمارهای آبیاری کامل بوده است و مشابه بوده است (Liu *et al*., 2015). بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی گیاه سیب‌زمینی مربوط به تیمار آبیاری کامل است (Golestani-Kermani *et al*., 2013). نتایج حاصل از اعمال تیمارهای مختلف آبیاری نشان داد که روش خشک‌کردن جزئی منطقه ریشه باعث کاهش کمتر وزن خشک سیب‌زمینی نسبت به کم‌آبیاری شد (Golestani-Kermani *et al*., 2013). اهمیت تغذیه فسفر برای تولید غده به‌خوبی اثبات‌شده است و کود فسفاته به‌طور معنی‌داری باعث افزایش مقدار فسفر قابل‌دسترس گیاه در خاک و تأثیر مثبت روی زیست‌توده و افزایش کارایی مصرف آب در گیاه سیب‌زمینی شد (Rosen *et al*., 2014). نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر نیز با این یافته‌ها مطابقت دارد و با توجه به افزایش ارتفاع بوته در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و ۳۱mg.Kg^{-1} کود فسفر، این تیمار آبیاری توانایی استفاده از نیتروژن قابل‌دسترس در انتهای فصل رشد را دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی بیشتر سبز می‌ماند و بعد از آبیاری کامل بیشترین زیست‌توده را دارد.

وزن غده در بوته

اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر وزن غده در بوته حاکی از تفاوت معنی‌داری بین تیمارها بود (جدول ۴). در تیمار آبیاری کامل بیشترین وزن غده در بوته و تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه کل دوره رشد با ۶۵ درصد کاهش نسبت به آبیاری کامل، کمترین وزن غده در بوته را به ثبت رساند. در رده دوم، تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی قرار گرفت و از سایر تیمارهای خشکی وزن غده در بوته بیشتری داشت و با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۴).

افزایش کود فسفاته از ۲۵ به ۳۱mg.Kg^{-1} افزایش ۱۴ گرمی وزن غده در بوته را به دنبال داشت. ولی این افزایش وزن ازلحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۵).

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفاته بر وزن غده در بوته حاکی از اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای مختلف بود (جدول ۶). با کاربرد ۲۵mg.Kg^{-1} کود فسفاته تیمار آبیاری کامل بیشترین مقدار وزن غده در بوته را نشان داد و با تیمارهای خشکی در آن سطح فسفات تفاوت معنی‌دار داشت. تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه کمترین مقدار وزن غده در بوته را دارا بود و با تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۶). با کاربرد ۳۱mg.Kg^{-1} فسفات، وزن غده در بوته در تیمار آبیاری کامل به ۳۳۲ گرم در بوته رسید که ۱۳ درصد افزایش داشت و با تمام تیمارها تفاوت معنی‌دار داشت. با افزایش سطح فسفات، در تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه از زمان گلدهی وزن غده در بوته با ۲۸ درصد افزایش به ۲۰۷ گرم در بوته رسید. وزن غده در بوته در سایر تیمارهای خشکی با افزایش میزان فسفات، کاهش یافت هرچند این کاهش ازلحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۶).

به‌طورکلی کمبود رطوبت خاک از طریق افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ، کاهش میزان فتوسنتز برگ، زیست‌توده اندام هوایی، رشد غده باعث کاهش عملکرد غده می‌گردد (Obidiegwu *et al*., 2015). سیب‌زمینی به کمبود رطوبت خاک حساس بوده و کاهش حجم آبیاری به‌خصوص در زمان آغازش غده و غده بندی، باعث افت عملکرد غده این گیاه می‌گردد (Eskandari *et al*., 2011). در مطالعه‌ای تعداد غده بالا و عملکرد بالا در تیمارهای آبیاری کامل و خشک‌کردن جزئی ریشه مشاهده شد. یک رابطه خطی بین کاهش عملکرد غده و میزان آبیاری مشاهده کردند. با کاهش میزان آبیاری و اعمال تنش خشکی، درصد ماده خشک اندام‌های هوایی و غده‌ها در سیب‌زمینی افزایش می‌یابد ولی کاهش عملکرد را به دنبال دارد (Yactayo *et al*., 2013). کاهش پتانسیل آب اطراف ریشه و کمبود آب در دسترس گیاه باعث می‌شود آب کمتری به بافت‌های زنده گیاه هدایت و درصد ماده خشک غده‌ها افزایش می‌یابد (Gültekin and Ertek, 2018; Eskandari *et al*., 2011). باوجوداینکه با کاهش آب میزان عملکرد غده کاهش می‌یابد ولی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و فسفر بالا افت عملکرد غده نسبت به بقیه تیمارها کمتر است و این به دلیل آبیاری نیمی از ریشه و هیدراته نگه داشتن گیاه به‌طوری‌که محتوای آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری ندارد و از طرفی استفاده بیشتر فسفر باعث رشد زیست‌توده بهتر نسبت به بقیه تیمارهای کم‌آبی بود. درنتیجه عملکرد غده نسبت به تیمار آبیاری کامل کمتر و از بقیه تیمارهای آبیاری بیشتر است.

کارایی مصرف آب

بررسی اثر تیمارهای آبیاری بر میزان کارایی مصرف آب گیاه سیب‌زمینی نشان داد بین تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌دار وجود دارد (جدول ۴). تیمار آبیاری کامل بیشترین مقدار زیست‌توده و درنتیجه بیشترین کارایی مصرف آب را به ثبت رساند (جدول ۵). کارایی مصرف آب در تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه کل دوره رشد با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۴)؛ و کمترین کارایی مصرف آب با ۳۶ درصد کاهش نسبت به تیمار آبیاری کامل، در تیمار کم‌آبیاری از زمان گلدهی مشاهده شد.

برهمکنش تیمار آبیاری و کود فسفاته نشان داد بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار آبیاری کامل و کاربرد ۳۱mg.Kg^{-1} کود فسفاته است و با تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و کاربرد ۲۵mg.Kg^{-1} فسفات

تفاوت آماری معنی‌داری نداشت (جدول ۶). کمترین کارایی مصرف آب در تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و کاربرد ۳۱mg.Kg-1 فسفات مشاهده شد و با تیمار کم‌آبیاری کل دوره رشد و کاربرد ۲۵mg.Kg-1 فسفات تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۶).

کارایی مصرف آب، ماده خشک تولید شده در واحد مصرف آب می‌باشد. ژنوتیپ‌ها و محصولات مختلف تحت خشکی کارایی مصرف آب متفاوت دارند (Fahad *et al*., 2017). پژوهشگران گزارش دادند کارایی مصرف آب بالاتر در گندم و گوجه‌فرنگی تحت خشکی نسبت به شاهد عمدتاً به دلیل کاهش میزان تعرق در خشکی بود (Nadeem *et al*., 2014).

کارایی مصرف آب در روش خشک‌کردن جزئی ریشه (کم‌آبیاری متناوب) نسبت به کم‌آبیاری سنتی افزایش یافته است که این امر نشان‌دهنده استفاده مناسب‌تر از آب در روش کم‌آبیاری متناوب است (Golestani-Kermani *et al*., 2013). در کم‌آبیاری متناوب افزایش کارایی مصرف آب به دلیل است که کاهش هدایت روزنه‌ها، تعرق را بیشتر از فتوسنتز کاهش می‌دهد. درحالی‌که در تنش‌های شدید و طولانی‌مدت روزنه‌ها کاملاً بسته شده و فتوسنتز پایین آمده و باعث کاهش کارایی مصرف آب و درنهایت کاهش عملکرد گیاه می‌شود (۱۳). پژوهشگران حداکثر راندمان مصرف آب را از کم‌آبیاری متناوب (خشک‌کردن جزئی ریشه) به‌دست آورده‌اند (Yactayo *et al*., 2013; Shi *et al*., 2015). درحالی‌که برخی پژوهشگران، بیشترین مقدار راندمان مصرف آب را از آبیاری کامل گزارش کرده‌اند. تفاوت در شرایط اقلیمی و محیطی، بافت خاک، شدت تنش واردشده و نوع رقم مورداستفاده در این گزارش‌ها و اینکه همگی در مزرعه انجام شده‌اند، تفاوت‌های ارائه شده را توجیه می‌کند. درمجموع، مطالب ذکرشده روش کم‌آبیاری متناوب (خشک‌کردن جزئی ریشه) را در استفاده از آب نسبت به آبیاری کامل و کم‌آبیاری سنتی کارایی بهتری را نشان می‌دهد (Golestani-Kermani *et al*., 2013). کارایی مصرف آب یک صفت مطلوب برای ایجاد تحمل به خشکی در گیاهان در مطالعات مدنظر می‌باشد درواقع گیاهانی که از کارایی مصرف آب بالاتری برخوردار هستند به ازای مصرف آب کمتر تولید بیشتری دارند (Zare Mehrjerdi *et al*., 2016). تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه ممکن است از طریق ارتقاء رشد ریشه موجب بهره‌برداری بهتر از ذخایر آب خاک شود. گرچه در این مطالعه میزان ریشه اندازه‌گیری نشد اما مطالعات متعددی نشان داده‌اند که خشک‌کردن جزئی ریشه عمق ریشه و تراکم ریشه را افزایش می‌دهد و هدایت هیدرولیکی بالاتر ریشه با محدودیت تأمین آب یافت می‌شود (Chai *et al*., 2016). همچنین سایر پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه هنگامی‌که پس از شروع بلوغ اعمال شود، تنها استراتژی صرفه‌جویی در آب قادر به حفظ عملکرد است و باعث افزایش قابل‌توجه در کارایی مصرف آب می‌شود (Yactayo *et al*., 2013). تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه در زمان بلوغ اعمال شود در مقایسه با روش‌های کم‌آبیاری، خشک‌کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد و آبیاری کامل توانایی استفاده از نیتروژن قابل‌دسترس در انتهای فصل رشد دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی بیشتر سبز می‌ماند. این اثر احتمالاً پر شدن غده که در اواخر فصل رشد و درنتیجه نگهداری عملکرد انجام می‌شود را توضیح می‌دهد.

نتیجه‌گیری

با توجه به شاخص‌های فیزیولوژیکی و مکانیسم‌های مورد مطالعه در این پژوهش، با اعمال تنش خشکی قدرمطلق پتانسیل اسمزی ۳۰ درصد افزایش یافته که به دلیل افزایش مواد محلول درون سلول است. در تیمار خشک کردن جزئی ریشه نیمی از ریشه در حالت خشکی قرار دارد تا با القاء اسیدآبسزیک باعث افزایش مواد محلول سلول و افزایش قدرمطلق پتانسیل اسمزی و تحمل بهتر تنش شود. به همین دلیل در آخر فصل گیاهان این تیمار آبیاری و تیمار آبیاری کامل سبز بودند ولی تیمار کم‌آبیاری خشک شده بودند.

در روش خشک کردن جزئی ریشه بعد از گلدهی، با افزایش کود فسفر، سبب رشد بیشتر ریشه و استفاده بهتر از نیتروژن خاک شده به‌طوری‌که ارتفاع بوته شش درصد از آبیاری کامل نیز بیشتر بود. باوجوداینکه با کاهش آب میزان عملکرد غده کاهش می‌یابد ولی در تیمار خشک کردن جزئی ریشه و فسفر بالا افت عملکرد غده نسبت به سایر تیمارهای خشکی ۲۰ درصد کمتر است و این به دلیل آبیاری نیمی از ریشه و هیدراته نگه داشتن گیاه می‌باشد، به‌طوری‌که محتوای آب برگ با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری ندارد و از طرفی استفاده بیشتر فسفر باعث رشد زیست‌توده بهتر نسبت به سایر تیمارهای کم‌آبی بود. درنتیجه عملکرد غده نسبت به تیمار آبیاری کامل کمتر و از بقیه تیمارهای آبیاری ۳۰ درصد بیشتر است. بدلیل فراهمی فسفر در۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم با افزایش فسفر شاخص پایداری غشاء، پتانسیل اسمزی و وزن غده تحت تاثیر افزایش فسفر قرار گرفتند ولی این تاثیر معنی‌دار نبود. اگر تیمار خشک‌کردن جزئی ریشه در زمان بلوغ اعمال شود در مقایسه با روش‌های کم‌آبیاری، خشک‌کردن جزئی ریشه از ابتدای رشد و آبیاری کامل توانایی استفاده از نیتروژن قابل‌دسترس در انتهای فصل رشد را دارد و نسبت به دیگر تیمارهای خشکی سبزمانی بیشتری دارد. این اثر احتمالاً پر شدن غده در اواخر فصل رشد و درنتیجه نگهداری عملکرد را توضیح می‌دهد. روش خشک‌کردن جزئی ریشه روش مناسب‌تری نسبت به روش کم‌آبیاری ازنظر صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد است.

منابع

1. Bayat, H., Mardani, H., Arouie, H., & Salahvarzi, Y. (2011). Effects of salicylic acid on morphological and physiological characteristics of cucumber seedling (*Cucumis sativus* cv. Super Dominus) under drought stress. *Journal of Plant Production 18*(3): 63-76. (In Persian with English abstract)
2. Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H.L., Waskom, R.M., Niu, Y., & Siddique, K.H. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development 36*(1): 1-21.
3. Chaki, M., Begara-Morales, J.C., & Barroso, J.B. (2020). Oxidative stress in plants. *Antioxidants 9*(6):481. https://doi.org/10.3390/antiox9060481.
4. Dashti, M., Kafi, M., Tavakoli, H., & Mirza, M. (2014). The effect of water deficit stress on water relations, photosynthesis and accumulation of osmolate in Nowruzak medicinal plant. *Iranian Journal of Crop Research* 12: 813-821. (In Persian with English abstract)
5. Eskandari, A., Khazaei, H.R., Nezami, A., & Kafi, M. (2011). Study of the effect of irrigation regime on yield and some qualitative characteristics of three potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Soil and Water, Agricultural Sciences and Industries 25*(2): 247-240. (In Persian with English abstract)
6. Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., & Ihsan, M.Z. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science* 8: 1147. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147.
7. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K.H. (2012). Drought stress in plants: an overview. *Plant Responses to Drought Stress* 1-33. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0.
8. Golestani-Kermani, S., Nouri-Emamzadei, M.R., Shayannejad, M., Shahnazari, A., & Mohammadkhani, A. (2013). Effects of water stress on quantitative and qualitative properties of potato crop (Agria c.v.) in deficit irrigation and partial root zone drying techniques. *Science and Engineering Irrigation 37*(3): 123-135. (In Persian with English abstract)
9. Gültekin, R., & Ertek, A. (2018). Effects of deficit irrigation on the potato tuber development and quality. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences 2*(3): 93-98. https://doi.org/10.31015/jaefs.18015.
10. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics 125*(1): 189-198.
11. Heidari, N., Puryousef, M., & Tavakoli, A. (2014). The effect of drought stress on photosynthesis, its related parameters and relative water content of *Pimpinella anisum* L. *Iranian Journal of Biology* 27: 829-839. (In Persian with English abstract)
12. Hussain, H.A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S.A., Men, S., & Wang, L. (2018). Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in Plant Science* 9: 393. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00393.
13. Kasman, A., & Duman, Y.S. (2015). CO_2 emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: a panel data analysis. *Economic Modelling* 44: 97-103. http://doi.org/10.1016/j.econmod.2014.10.022.
14. Liu, G., Rubaek, C.H., Liu, F., & Andersen, M.N. (2015). Effect of partial root-zone drying and deficit irrigation on nitrogen and phosphorus uptake in potato. *Agriculture Water Management* 59: 66-76.
15. Nadeem, S.M., Ahmad, M., Zahir, Z.A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances 32*(2): 429-448. http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005.
16. Obidiegwu, J.E., Bryan, G.J., Jones, H.G., & Prashar, A. (2015). Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in Plant Science* 6: 542. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00542.
17. Quandahor, P., Lin, C., Gou, Y., Coulter, J.A., & Liu, C. (2019). Leaf morphological and biochemical responses of three potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars to drought stress and aphid (*Myzus persicae* Sulzer) infestation. *Insects 10*(12): 435. https://doi.org/10.3390/insects10120435.
18. Roosta, H.R., Nazari F., & Shahnazari, A. (2010). Comparative effects of conventional irrigation (CI) and partial root zone drying (PRD), and various sources of nitrogen on growth and yield in potato under field condition. *Advance in Environmental Biology 4*(1): 117-124.
19. Rosen, C.J., Kelling, K.A., Stark, J.C., & Porter, G.A. (2014). Optimizing phosphorus fertilizer management in potato production. *American Journal of Potato Research 91*(2): 145-160. https://doi.org/10.1007/s12230-014-9371-2.
20. Shi, S., Fan, M., Iwama, K., Li, F., Zhang, Z., & Jia, L. (2015). Physiological basis of drought tolerance in potato grown under long-term water deficiency. *International Journal of Plant Production 9*(2): 305-320.

21. Shock, C.C., Wang, F.X., Flock, R., Feibert, E.B.G., Shock, C.A., & Pereira, A. (2013). Irrigation monitoring using soil water tension. file:///C:/Users/JAFARN~1/AppData/Local/Temp/em8900.pdf
22. Sun, Y., Cui, X., & Liu, F. (2015). Effect of irrigation regimes and phosphorus rates on water and phosphorus use efficiencies in potato. *Scientia Horticulturae* 190: 64-69. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.04.017.
23. Thalmann, M., & Santelia, D. 2017. Starch as a determinant of plant fitness under abiotic stress. *New Phytologist 214*(3): 943-951. https://doi.org/10.1111/nph.14491.
24. Yactayo, W., Ramírez, D.A., Gutiérrez, R., Mares, V., Posadas, A., & Quiroz, R. (2013). Effect of partial root-zone drying irrigation timing on potato tuber yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management* 123: 65-70. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.009.
25. Zare Mehrjerdi, M., Bagheri, A., Bahrami, A.R., Nabati, J., & Masoumi, A. (2016). The effect of drought stress on osmotic regulation, proline variability and root and leaf soluble sugars and its relationship with drought tolerance in twelve chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. *Iranian Crop Science 47*(3): 462-451. (In Persian)